МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЫШАЮЩЕГО ИМПУЛЬСНОГО СТАБИЛИЗАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ

К.В. Богданов

Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. М.Ф. Решетнёва. г. Красноярск
E-mail: k_bogdanov@rambler.ru

Рассматриваются основные схемы конвертеров с широтно-импульсной модуляцией с точки зрения их анализа и синтеза. Предложена методика моделирования данных устройств при помощи программных продуктов Simulink и Mathcad с использованием структурных схем. Методика позволяет вводить коррекцию по быстродействию во все схемы конвертеров.

В связи с широким спектром применения электронных устройств актуальной является проблема обеспечения требуемого качества выходных параметров преобразователей напряжения: КПД, коэффициентов пульсации, стабилизации, быстродействия схем стабилизации (особенно при коммутации реактивной нагрузки). Используя конвертеры с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) в качестве стабилизаторов, можно эффективно управлять параметрами выходного напряжения, обеспечивая приемлемые массогабаритные показатели проектируемых устройств.

Существуют три основные схемы преобразователей напряжения [1, 2]: с понижением или повышением напряжения, а также инвертирующая схема. Эти схемы относят к классу нелинейных импульсных систем автоматического регулирования. Все три типа преобразователей можно представить в виде структурной схемы, представленной на рис. 1. Здесь $Ф_Н(p)$ – нелинейная передаточная функция (ПФ), $W_{УС}(p)$ – ПФ звена обратной связи, $F[x]$ – ПФ корректирующего устройства, x – разность между входным напряжением и сигналом от схемы управления, ε – напряжение ошибки, $F_{ГПН}$ – сигнал с генератора пилообразного напряжения, $U_Н$ – напряжение на нагрузке, $U_{СТ}$ – опорное напряжение.

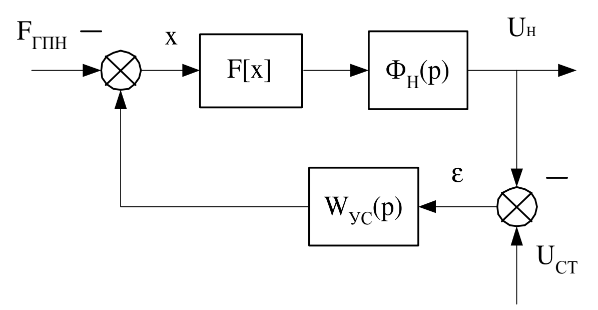


Рис. 1. *Структурная схема преобразователя*

Такая система автоматического регулирования относится к классу нелинейных систем, т.к. содержит существенно нелинейный элемент с релейной характеристикой.

В подавляющем большинстве практических случаев ПФ $Ф_Н(p)$ обладает свойством фильтра [3]. Для анализа устойчивости и синтеза подобной системы может быть применен метод гармонического баланса (гармонической линеаризации). Под анализом устойчивости следует понимать определение возможности схемы обеспечивать стабильные выходные характеристики (опорное напряжение, коэффициент пульсации, характеристики переходных процессов при коммутации нагрузки и изменении входного напряжения) при заданном наборе входных параметров (диапазон изменения входного напряжения, характер и величина нагрузки). Синтез – определение номиналов элементов конвертера, исходя из заданного набора величин: величины и диапазона изменения входного напряжения, КПД, коэффициентов пульсации и стабилизации, максимальной мощности нагрузки и характеристик переходных процессов при коммутации.

С точки зрения метода гармонического баланса задача исследования устойчивости схемы (рис. 1) сводится к определению условий возникновения автоколебаний в системе при наличии вынужденных колебаний и постоянной составляющей на входе.

Однако, данная методика анализа и синтеза конвертеров справедлива в случае, если ПФ линейна. Этому условию удовлетворяет схема конвертера с понижением напряжения.

Для оставшихся схем преобразователей значения вещественной и мнимой части $Ф_Н(p)$ зависят от частоты, постоянной составляющей и амплитуды колебаний. Аналитически решить задачи анализа и синтеза в этом случае затруднительно. С помощью

пакетов программ из группы *EDA* или *CAE* (*Microcap*, *Mathcad* и *Matlab*), используя структурные схемы, можно для различных значений постоянной составляющей, амплитуд вынужденных колебаний и автоколебаний построить семейство частотных характеристик и решить графоаналитическим методом задачи анализа и синтеза [4].

Структурная схема для конвертера с повышением напряжения имеет вид, представленный на рис. 2.

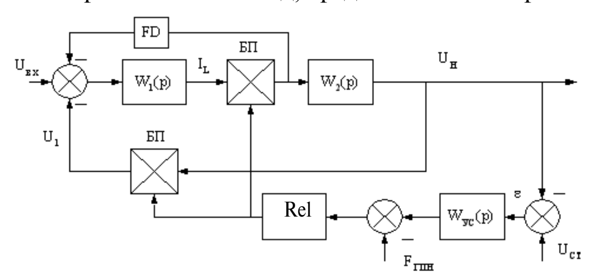


Рис. 2. *Детализированная структурная схема преобразователя с повышением напряжения*

Здесь БП – блок перемножения, $U_{вх}$ – входное напряжение, I_L – ток дросселя, U_1 – результат перемножения ошибки ε и $U_Н$, *Rel* – релейный элемент, $W_1(p)$ – ПФ дросселя с учётом его внутреннего сопротивления, $W_2(p)$ – ПФ конденсатора с параллельно включенной нагрузкой, *FD* – нелинейный блок (выпрямитель). Блок *FD* играет существенную роль в режиме прерывистых токов. В режиме непрерывных токов влияние нелинейного блока *FD* незначительно, поэтому его можно исключить из схемы.

$$W_1(p) = \frac{1}{Lp + R_L}, \quad W_2(p) = \frac{R}{RCp + 1},$$

где R_L и L – активное сопротивление и индуктивность дросселя фильтра, C – ёмкость конденсатора фильтра, p – оператор Лапласа, R – сопротивление нагрузки.

ПФ объекта управления невозможно представить в форме Коши. Не может быть аналитически получено и семейство фазовых траекторий системы для синтеза $W_{УС}(p)$.

Фазовые траектории системы могут быть построены при помощи численных методов с использованием возможностей программных продуктов *Matlab* версии 6.5 (расширения *Simulink*) и *Mathcad* 2000 [5–8].

Simulink позволяет с помощью методов визуального проектирования смоделировать структурную схему конвертера с повышением напряжения. Возможно моделирование структурной схемы, позволяющей построить фазовые траектории для конвертера. При этом на выходе схемы получается величина ошибки и её производная по времени. Ключевым моментом является задание начальных условий при нулевом уровне входного сигнала (напряжения). Предлагается следующая методика:

– производится моделирование при ненулевом уровне входного сигнала (максимальная величина входного напряжения);
– значения на входах и выходах блоков структурной схемы в конечный момент запоминаются (сохраняются в виде файла «состояния системы»);
– устанавливается нулевой уровень входного сигнала;
– сохраненные значения устанавливаются в блоках как начальные значения;
– производится моделирование на временном отрезке, большем времени регулирования системы.

Пример полученных в системе *Matlab* фазовых траекторий (X – разность между напряжением нагрузки и опорным, E – производная X) приведен на рис. 3.

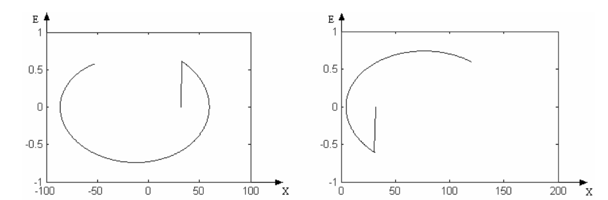


Рис. 3. *Фазовые траектории для конвертера с повышением напряжения*

Исходные данные для примера (задание на проектирование):

– выходное (опорное напряжение) – 32 В;
– диапазон входных напряжений – от 25 В до 32 В;
– максимальная мощность нагрузки – 320 Вт;
– коэффициент пульсации – 0,4;
– коэффициент стабилизации – 0,7;
– частота преобразования – 50 кГц;
– КПД – 95 %.

Несмотря на широту предоставляемых возможностей, используемые версии пакета *Simulink* и системы *Matlab* имеют ряд недостатков:

– невозможность вывода в одном графическом пространстве более одного графика;
– неразвитость средств отображения графической информации, (невозможность масштабирования некоторых типов графиков, отсутствие координатной сетки);
– сложность в задании начальных условий для ПФ в *Simulink*.

Таким образом, получив необходимую информацию в процессе моделирования при помощи пакета *Simulink*, её нужно сохранить и обработать в более подходящей для этих целей системе.

Система *Mathcad* обладает гораздо более развитыми средствами анализа и отображения графической информации. Поэтому результаты моделирования из среды *Matlab* необходимо передать в среду *Mathcad*. В данном случае (для фазовых траекторий) это производится через внешний файл, в который системой *Matlab* при моделировании схемы вносятся значения ошибки, производной ошибки и временные метки.

На погрешность построения всех характеристик в системе *Mathcad* влияет шаг дискретизации в системе *Matlab* (*sample time*). В случае малого дис-

кретного шага (большего, чем шаг, используемый в численном методе расчёта) возможно получение неверного результата, выражающегося в резких всплесках или провалах на характеристиках.

Фазовые траектории, переданные в систему *Mathcad*, представляются на одном графике (рис. 4).

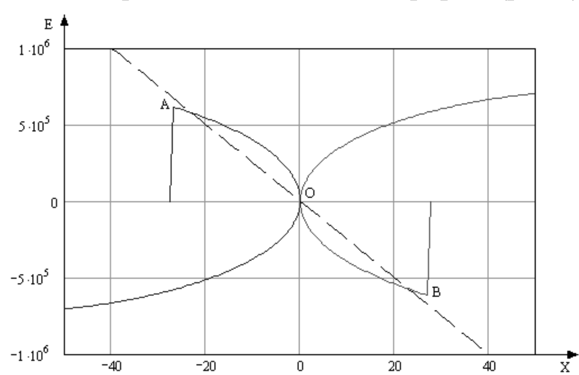


Рис. 4. *Фазовые траектории и линия переключения в Mathcad*

Линия переключения представляет собой в идеале кривую АОВ, получаемую из двух фрагментов фазовых траекторий. Для упрощения коррекции можно аппроксимировать точки идеальной линии переключения АОВ. В данном случае в качестве линии переключения взята прямая (наиболее простой вариант, возможна, например, квадратичная функция). Поэтому система будет квазиоптимальной.

Таким образом, можно осуществить коррекцию быстродействия переходных процессов для данного конвертера, найдя линию переключения ключа, например, графическим способом. Схема, осуществляющая такую коррекцию, должна иметь линейную зависимость. В реальном устройстве коррекция может быть выполнена на операционном усилителе [9].

С помощью представленной методики возможно оперировать моделью конвертера, описать которую при помощи дифференциальных уравнений, разрешимых относительно младших производных, не представляется возможным.

Система *Matlab* используется в предложенной методике для моделирования и построения характеристик конвертера, система *Mathcad* – для анализа и синтеза. Таким образом, данная методика позволяет численно рассчитывать корректирующие звенья для широтно-импульсных схем преобразователей как с понижением напряжения, так и с повышением. Процесс расчёта легко управляем и адаптивен, что позволяет разработчику вносить изменения на любом этапе проектирования устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1972. – 768 с.
2. Моин В.С., Лаптев Н.Н. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергия, 1972. – 512 с.
3. Ловчиков А.Н., Носкова Е.Е. Анализ и синтез широтно-импульсных систем // Электротехника. – 1998. – № 12. – С. 33–37.
4. Стешенко В.Б. EDA. Практика автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств. – М.: Нолидж, 2002. – 250 с.
5. Норенков И. П. Основы автоматизированного проектирования – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 336 с.
6. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических систем с использованием пакета Mathcad. Учебное пособие. – М.: Изд-во “Горячая линия – Телеком”, 2004. – 319 с.
7. Глушаков С.А. Математическое моделирование. Mathcad 2000, Matlab 5. – М.: Изд-во “АСТ”, 2001. – 528 с.
8. Дьяконов В.П. Mathcad 8/2000: специальный справочник. – СПб.: Питер, 2000. – 592 с.
9. Костиков В.Г., Парфёнов Е.М., Шахнов В.А. Источники электропитания электронных средств – М.: Изд-во “Горячая линия – Телеком”, 2001. – 342 с.